

В.А. КОЛБАСИН**ОЦЕНКА ОТКЛОНЕНИЯ ОТ НОМИНАЛА ЧАСТОТ
ДВУХТОНАЛЬНОГО СИГНАЛА НАБОРА НОМЕРА**

У роботі розглянуто метод оцінювання відхилення частот сигнальних компонентів (СК) двотонального сигналу набору номера від номіналу та потужності СК. За цим методом оцінки знаходяться по двом оцінкам спектральної щільності потужності з різними значеннями ширини елементу розрізнення за частотою. Розглянуто величину похибки оцінки та межі застосування даного методу.

Введение. При разработке систем компьютерной телефонии актуальной является задача распознавания сигналов набора номера в тональном режиме (ННТР). Сигнал ННТР представляет собой сумму двух синусоидальных сигналов (сигнальных компонент, СК), частоты которых f_1, f_2 выбираются из множества допустимых частот F . Выбор конкретных значений частот f_1, f_2 определяет передаваемую цифру. Параметры сигнала ННТР определяются стандартом [1].

В большинстве приложений применяется классическая методика распознавания сигнала, изложенная в частности в работе [2]. Согласно ей на анализируемом участке сигнала вычисляются оценки спектральной плотности мощности (СПМ) на всех частотах множества F . Среди вычисленных оценок находятся две частоты с наибольшими оценками СПМ, и исходя из предположения, что они являются частотами СК, выполняется проверка соответствия параметров сигнала требованиям стандарта [1]. Однако при этом величина допустимого отклонения частоты СК от номинала задается неявно выбором ширины элемента разрешения по частоте при вычислении оценок СПМ, используемых при проверке допустимости отношения мощностей СК (твист). Поскольку стандарт задает отдельные требования для каждого из вышеперечисленных параметров, то при их совместном отклонении от номинальных значений использование значения твиста для определения соответствия сигнала требованиям стандарта будет некорректно. В этом случае, декодер может произвести как ложное определение, так и ложный пропуск цифры.

Цель работы. Целью данной работы является разработка методики оценивания мощности СК и отклонения частоты СК от номинала.

Анализ. Будем рассматривать спектр анализируемого сигнала как сумму спектра помехи $S_{NS}(f)$ и спектра незашумленного сигнала ННТР $S_{ННТР}(f)$:

$$S'(f) = S_{NS}(f) + S_{ННТР}(f). \quad (1)$$

Оценка СПМ сигнала (1) на частоте f_1 представляет собой свертку функции прямоугольного окна $W(f)$ и спектра сигнала [3]:

$$S(f_1) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{NS}(g) \cdot W(f_1 - g) dg + \int_{-\infty}^{\infty} S_{ННТР}(g) \cdot W(f_1 - g) dg. \quad (2)$$

Так как функция спектра прямоугольного окна убывает с увеличением частоты, влиянием гармоник помехи, значительно удаленных от частоты, на которой вычисляется оценка СПМ, можно пренебречь. Тогда при относительной равномерности спектра помехи в области частот сигнала ННТР саму помеху будем рассматривать как белый шум. Следствием этого допущения будет то, что вклад энергии помехи в оценки СПМ не будет зависеть от частоты и будет равняться:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \langle S_{NS}(g) \rangle \cdot W(f - g) dg = S'_{NS} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} W(f - g) dg = S_{NS}, \quad (3)$$

где S'_{NS} - уровень помехи в частотной области;

S_{NS} - энергия помехи, приходящаяся на элемент разрешения по частоте.

В предположении о том, что в области частот сигнала ННТР присутствуют лишь две явно выраженные гармоники, соответствующие частотам СК, оценка СПМ по незашумленному сигналу на одной из частот СК (для определенности обозначим ее как f_1) можно представить в виде:

$$S(f_1) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{ННТР}(g) \cdot W(f_1 - g) dg = S_1 \cdot W(f_1 - f'_1) + S_2 \cdot W(f_1 - f'_2), \quad (4)$$

где f_1 - номинальная частота СК, на которой вычисляется оценка СПМ;

f'_1, f'_2 - реальные частоты СК;

S_1, S_2 - реальные мощности СК.

С учетом (4) выражение (2) примет вид:

$$S(f_1) = S_{NS} + S_1 \cdot W(f_1 - f'_1) + S_2 \cdot W(f_1 - f'_2). \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что, вычислив оценки СПМ на двух частотах СК при двух различных длинах окон, теоретически можно найти реальные значения частот СК. Однако, внутри допустимых стандартом пределов изменения частоты СК можно найти такие две частоты $f_{2,1}$ и $f_{2,2}$, для которых выполняются условия:

$$W(f_2 - f_{2,1}) = W(f_2 - f_{2,2}), \quad W(f_1 - f_{2,1}) = W(f_1 - f_{2,2}). \quad (6)$$

Поэтому на практике в рамках данного подхода найти значения частот СК не представляется возможным. Тем не менее, если пренебречь взаимным влиянием СК, выражение (5) примет вид:

$$S(f_1) = S_{NS} + S_1 \cdot W(f_1 - f'_1). \quad (7)$$

Поскольку $W(f)$ симметрична и в пределах главного лепестка бина $W(|f|)$ непрерывно убывает, по значению $W(f - f')$ можно будет однозначно определить абсолютное значение величины отклонения частоты СК от номинала. Для этого необходимо вычислить как минимум две оценки СПМ на одной и той же частоте, но с разной шириной бина (длиной окна анализа). Для двух оценок СПМ при длинах окон анализа N_1, N_2 на основании (7) составим систему уравнений:

$$\begin{cases} S_1(f_1) = S_1 \cdot W_{N_1}(f_1 - f'_1) + S_{NS} \\ S_2(f_1) = S_1 \cdot W_{N_2}(f_1 - f'_1) + S_{NS} \end{cases}, \quad (8)$$

из решения которой найдем модуль отклонения частоты от номинала $|f_1 - f'_1|$ и значение реальной мощности СК $S_{\text{ННПР}}(f)$.

После выполнения простых преобразований и подстановки в (8) значения спектра прямоугольного окна получим:

$$\frac{S_1(f) - S_{NS}}{S_2(f) - S_{NS}} = \frac{N_2 \cdot \sin(\pi \cdot (f_1 - f'_1) \cdot N_1 / f_{\text{смп}})}{N_1 \cdot \sin(\pi \cdot (f_1 - f'_1) \cdot N_2 / f_{\text{смп}})}. \quad (9)$$

Поскольку (9) имеет вид гиперболической функции, для практических применений имеет смысл использовать ее аппроксимацию:

$$\frac{S_1 - S_{NS}}{S_2 - S_{NS}} = \frac{a}{(|f_1 - f'_1| + b)} + c. \quad (10)$$

Коэффициенты аппроксимации вычисляются следующим образом. Поскольку правая часть (9) устремляется в бесконечность при $|f_1 - f'_1| \cdot N_2 / f_{\text{смп}} = 1$, смещение аргумента b найдем из соотношения:

$$b = f_{\text{смп}} / N_2. \quad (11)$$

Коэффициенты a и c найдем как параметры эквивалентной линейной регрессии $y = a \cdot x + c$ после выполнения следующей замены переменных [4]:

$$x = \frac{1}{(|f_1 - f'_1| - b)}, \quad y = \frac{W_{N_1}(|f_1 - f'_1|)}{W_{N_2}(|f_1 - f'_1|)}. \quad (12)$$

С использованием аппроксимации (10) отклонение частоты от номинала будет вычисляться по формуле:

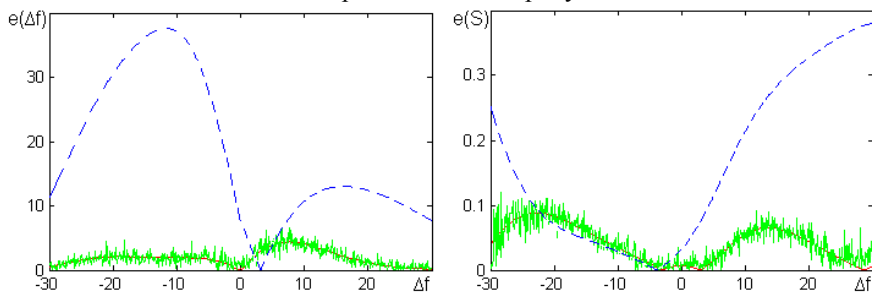
$$|f - f'| = \frac{a}{(S_1 - S_{NS}) / (S_2 - S_{NS}) - c} + b, \quad (13)$$

а оценка мощности СК по формуле:

$$S(f) = \frac{\pi \cdot S_2(f) \cdot N_2 \cdot |f_1 - f'_1|}{f_{\text{смп}} \cdot \sin(\pi \cdot N_2 \cdot |f_1 - f'_1| / f_{\text{смп}})}. \quad (14)$$

Поскольку значение ошибки аппроксимации внутри основного лепестка бина не превышает 10%, данную аппроксимацию вполне можно применять при распознавании сигналов ННТР.

Результаты. Для проверки адекватности предложенного метода были сформированы тестовые сигналы ННТР, в которых частота одной СК изменялась в пределах главного лепестка бина. Для этих сигналов с помощью предложенного метода находились оценки отклонения частоты СК от номинала и мощности СК. Графики ошибки оценивания для сигнала с частотами СК 852 и 1336 Гц представлены на рисунке.



Графики ошибок оценивания отклонения частоты СК от номинала и мощности нормированной СК. Сплошной линией обозначены ошибки оценок при наличии белого шума, пунктирной – при наличии гармонической помехи с мощностью, равной мощности СК на частоте 770 Гц.

Как видно из рисунка ошибка оценивания является достаточно большой в середине спадов главного лепестка бина, но уменьшается ближе к краю. Также из рисунка следует, что при наличии гармонической помехи ошибка оценивания резко увеличивается.

Выводы. Предложенный в работе метод позволяет на основании двух оценок СПМ на одной и той же частоте, полученных при различных ширинах бина, вычислить отклонение частот СК от номинала и скорректировать оценку мощности СК. Несмотря на достаточно большую ошибку оценок, метод вполне можно применять при распознавании сигналов ННТР. При этом в декодере ННТР необходимо предусмотреть оценку типа шума и применять данный метод только при отсутствии явно выраженных гармонических помех в области сигнала ННТР.

Список литературы: 1. CCITT Blue Book, Recommendation Q.24: Multi-Frequency Push-Button Signal Reception, - Geneva, 1989. 2. Analog Devices, DSP Applications using the ADSP-2100 Family. Prentice-Hall, 1992. 3. Г. Дженкинс, Д. Ватмс, Спектральный анализ и его приложения, – М.Мир - 1971, 4. Справочник алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. – М. Наука, 1987. – 240 с.

Поступила в редколлегию 20.09.05